

# 冷間圧延におけるロール挙動と 表面性状予測トータルシステムの開発

長岡技術科学大学 工学部 機械系

教授 久曾神 煌

(平成5年度研究開発助成 AF-93009)

## 1. 研究の背景

冷間圧延時のロール挙動の実時間測定と実時間制御は長年の課題であった。最近非接触変位計の高精度化と高速度・高精度圧電素子の開発により可能性が見えてきた。また光沢度・表面粗さ・形状欠陥などの表面性状は機能及び視覚品位の面から重要である。この分野は従来より理論面を中心に研究されてきているが、表面凹凸形状を三次元的に測定評価する有効な手段がなかったため、表面性状と表面機能を定量的に関係付けることができなかった。

この研究は冷間圧延材を対象にして、表面機能に直接対応した新たな三次元形状パラメータ、一例として局所光沢度と形状欠陥に対応した被測定面の微小面素の傾斜の平均値と分散を考える。これらの全面積分布と局所光沢度を幾何光学的に関係づけるとともに、視覚的に同定した形状異質部のオリジナル幾何情報を逆解法で推定する手段の開発も行う。さらにロール挙動を実時間で測定し、心振れや撓みに応じた電圧で圧電素子を駆動して圧延ロールを制御し、圧延板の高機能化を図る。

## 2. 研究方法／実験方法および研究成果／実験結果

### 2.1 圧延ロール挙動の実時間測定。

実機の圧延ロール挙動を直接測定する前に、回転軸が縦軸の精密回転機構を試作し、その心振れと形状誤差を実時間で同時測定を試みた。心振れ $0.2\mu\text{m}$ 以内の特製の精密軸受の回転軸中央に基準球を取り付け、3点法およびIRM法により心振れおよび基準球の形状誤差を、実時間同時測定した。心振れの値には再現性はなく毎回異なるので両方

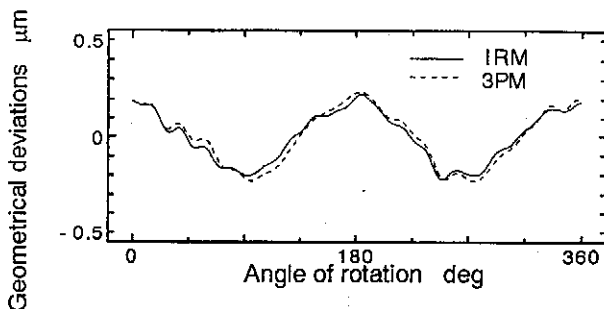


図1 Comparison of geometrical deviations measured by Three-point-method and by IRM

法による基準球の形状誤差を比較することにより測定精度を推察した。両者は図1に示すように $0.03\mu\text{m}$ 以内で良く合っている。

### 2.2 微動ステージの開発。

図2に示す微動ステージを開発した。積層型圧電素子6枚を用いた3自由度 $x-z-\beta$ ( $y$ 軸回りの回転)のもので性能は表1に示す。400N負荷の下でも精度に変化は見られない。

### 2.3 圧延ロールの実時間制御。

圧延ロールの実時間制御の予備実験として1で開発した測定法と2で開発した微動ステージを用いて位置制御を行ない心振れを0にすることを試みた。回転速度が $0.25\text{rpm}$ というごく低速の場合は半径方向(図3)も $z$ 方向(図4)も心振れがほぼ $0(0.03\mu\text{m})$ 以下になっている。

### 2.4 圧延ロール表面性状の実時間測定

まず、圧延ロールのモデルを対象に表面性状(特に、表面粗さ)測定の信頼性について検討した。測定装置はオプティカルファイバーを用いた既存の測定システム<sup>4-1)</sup>を一部改造したものと研究分担者らが開発した円筒面用反射光測定システム<sup>4-2)</sup>とした。ロール磨耗が表面凹凸形状の突起先端部で顕著となることにより、正反射方向近傍と周辺部

表1 Static characteristics of X-Z- $\beta$

Direction	Maximum displacement	Positioning resolution	Motion error
X	$\pm 1.5\mu\text{m}$	$0.01\mu\text{m}$	$\pm 0.02\mu\text{m}$
Z	$\pm 6\mu\text{m}$	$0.01\mu\text{m}$	$\pm 0.02\mu\text{m}$
$\beta$	$\pm 6\text{arcsec}$	$0.02\text{arcsec}$	$\pm 0.02\text{arcsec}$

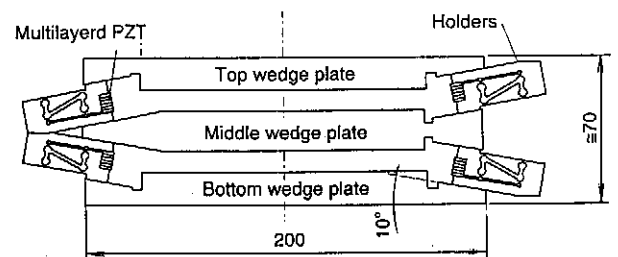


図2 Fine motion stage

との照度または強度の比 (対比光沢度に類似した工業量) を取って表面性状の評価を行った。表面凹凸形状の波長帯域と平均粗さの大きさによって照射するビーム径と入射角度

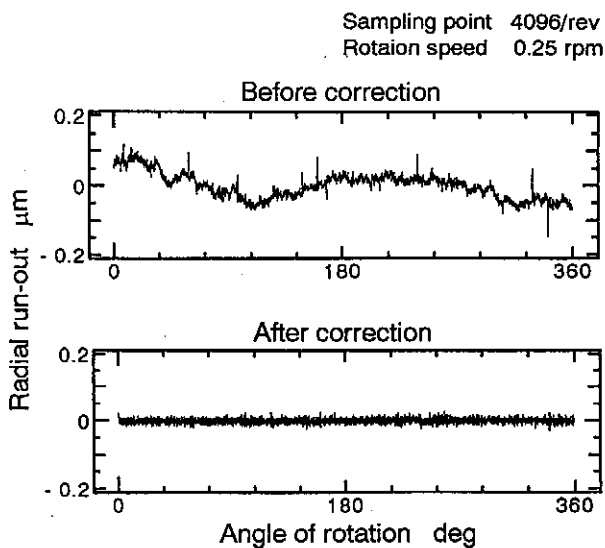


図3 Correction of spindle error in x direction using master (Sampling point 4096/rev, Rotation speed 0.25rpm)

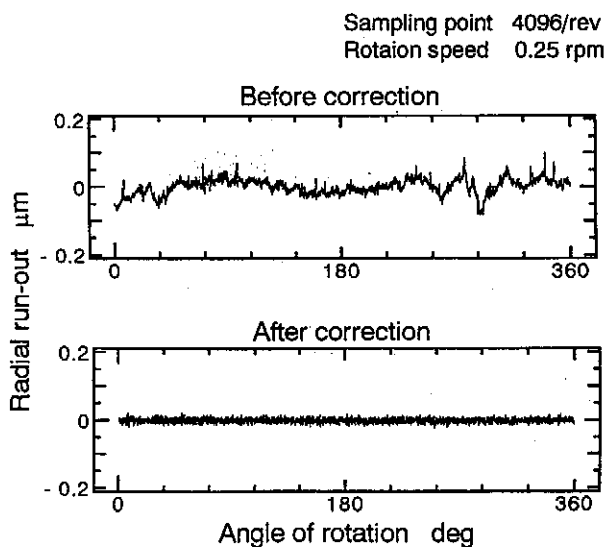


図4 Correction of spindle error in z direction using master (Sampling point 4096/rev, Rotation speed 0.25rpm)

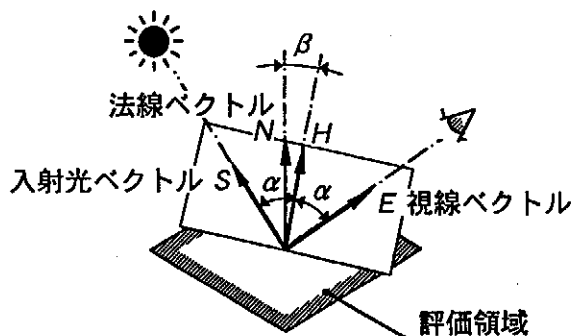


図5.1 Cook-Torranceのシェーディングモデル

を変更する必要があること、被測定表面に液体や付着物がある場合は計測不可能となるため除去対策が不可欠なことを明らかにした。すなわち、JIS B 0601によるRaが0.1  $\mu\text{m}$ 以下のサンプルに対しては既存のシステムでも対処できたが、それ以上の粗さでは $60^\circ$ を越える入射角度が必要となった。それに関連して受光部の位置を反射面に接近させる機構が不可欠となった。本研究では表面粗さの絶対値測定は意図せず、時間経過による表面凹凸形状の相対的な変化を重視することにした。上記の信号処理より得られたパラメータは大きければつきを持ったため、最終的な評価指標を得るまでに場所と時間の両ドメインでの平滑化を要した。

### 3. 圧延板表面の視覚品位と光沢度分布を目的とした三次元表面凹凸形状の評価

#### 3.1 反射光特性の解析モデル

鋼板のような典型的な金属材料では反射光の殆どが表面反射であるので、拡散反射を無視し、鏡面反射のみを対象とした。表面に微視的な凹凸が存在する場合は、Beckmannの理論<sup>5-1)</sup>に従って反射光が散乱するものと考えた。さらに、表面うねりのような巨視的な凹凸が存在する場合は図5.1に示すCook-Torrance<sup>5-2)</sup>のモデルを適用した。すなわち、理想的な平面の評価領域(面素)を想定し、入射光ベクトルを視線ベクトルの幾何学的関係および隣接面素との干渉を考慮した。図中の面素に対する相対輝度Lは次式で表される。 $L = I G / (\vec{N} \cdot \vec{E})$

ここで、Iはベックマンの散乱光強度分布関数を示し、Gは面素の傾斜と光線のベクトルから算出される幾何学的減衰係数である。Iには評価領域内の微視的表面凹凸の相関長Tと高さの標準偏差、および光源の波長が変数として含まれている。

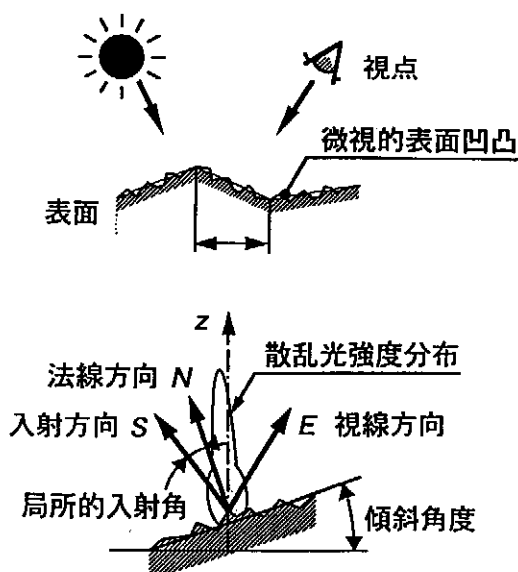


図5.2 金属表面での光反射モデル

各面素における反射光（散乱光強度分布）は図5. 2のようになり、それらを表面全域で重ね合わせることでより輝度分布が求められる。面素は幾何光学を適用するための大きさとしたため、光の波長よりも十分に大きくする必要はある。しかしながら、巨視的な表面凹凸形状と微視的な表面凹凸形状の波長帯域を明確に分離する理論的根拠がないため、試料面の自己相関関数から誘導される情報を利用した。すなわち、十分に長い測定データから得られる相関長と評価領域幅 $S_w$ の比が一定値に漸近する帯域の $S_w$ を採用した。試料の代表について求めた結果 $S_w = 10\mu\text{m}$ が得られた。Cook-Torranceのモデルでは各面素の法線ベクトルが必要となる。そこで、格子点状のサンプルデータから二次曲面適合の平滑化微分法により法線ベクトル（傾斜成分）を算出した。本研究の場合、サンプリング間隔を $\Delta x = \Delta y = 5\mu\text{m}$ としたため評価領域は $3 \times 3 = 9$ 点のデータから成る。法線ベクトルの成分を $(N_x, N_y, 1)$ として図5. 3のように投影平面に点で表示した。全ての面素の法線ベクトルが原点 $O$ に集中した場合は、巨視的な表面凹凸形状の影響を考慮しなくてもよいことになる。

ベックマンの散乱光強度分布関数は面素ごとに傾斜補正を行って視線ベクトル基準の分布形に座標変換する必要が

ある。図5. 4に示すように各面素の法線ベクトルから入射方向と視線方向を $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ で置き換えることになる。

### 3. 2 実験に用いた鋼板試料面

試料面はSUS430系のステンレス鋼とした。圧延前後の表面形状を比較するために母材も試料とした。図5. 5に表面凹凸波形を断面曲線群による鳥瞰図で示した。俗称のダルは規則的なパターンのロールにより創成されたものである。図中に表面凹凸の確率密度分布も併記した。母材表面は通常の工学表面に見られるようなランダム過程の特徴を示すが、ダル面は異なる2つの性質が重ね合わさっていることが分かる。また、前章のデータ処理手法による巨視的な傾斜情報（法線ベクトル）としては図5. 6に示すものが得られた。面素の傾きにおいてわずかな方向性が見られる。一方、微視的な表面凹凸形状は図5. 7に示すように場所によって有意差が生じた。ダル1とダル2では圧延時間が異なっており、ロール表面のパターンに微視的変化があることを示唆している。3カ所の粗さパラメータ（高さの標準偏差と相関長さ）のばらつき程度を図5. 8に、それらの平均値を表5. 1に示す。ベックマンの散乱理論の式に代入するための実測データである。

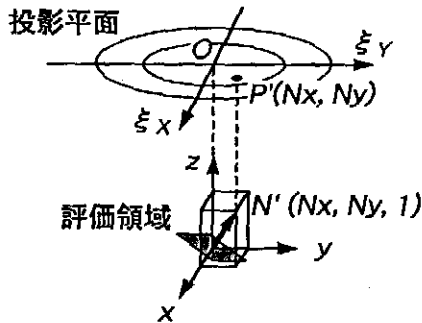


図5. 3 法線ベクトルのx-y平面投影

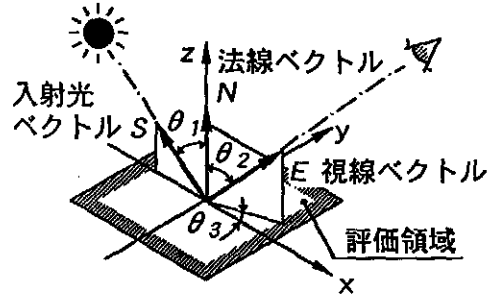


図5. 4 面素と錯乱光計算の座標

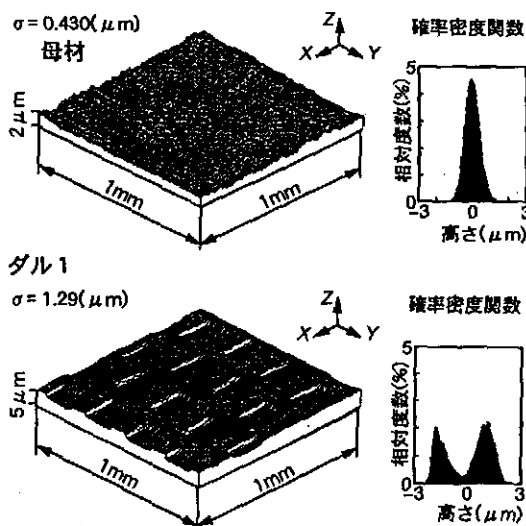


図5. 5 試料面の巨視的表面凹凸波形

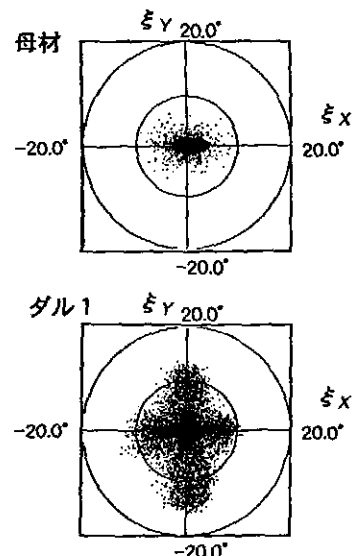


図5. 6 法線ベクトル成分の散布図

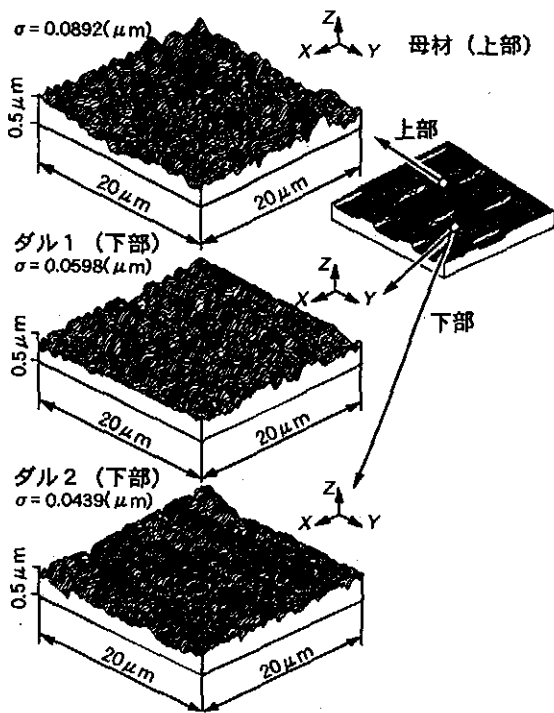


図5.7 試料面の微視的表面凹凸波形

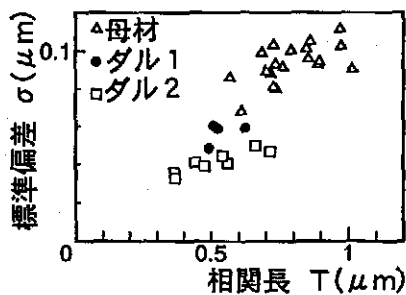


図5.8 高さの標準偏差と相関長の散布図

表5.1 微視的表面凹凸波形の評価結果

試料	標準偏差 $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	相関長 $T$ ( $\mu\text{m}$ )
母材 (上部)	0.100	0.866
ダル1 (下部)	0.0566	0.539
ダル2 (下部)	0.0411	0.518

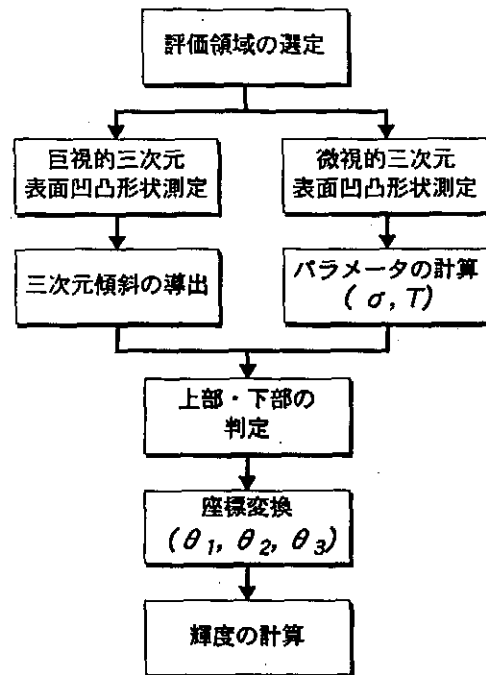


図5.9 表面凹凸形状データによる反射光分布のシミュレーション

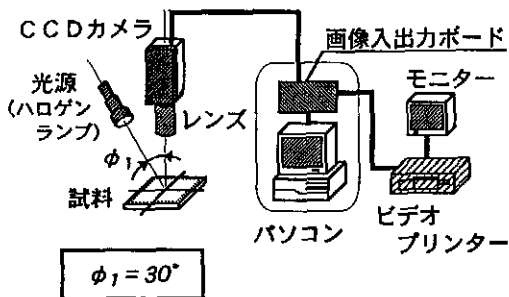


図5.10 表面画像の測定システム

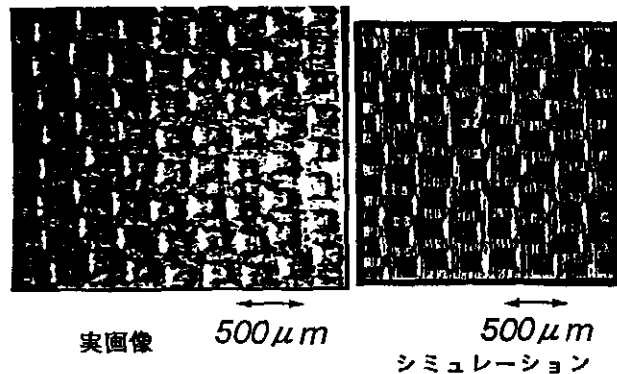


図5.11 実測画像とシミュレーション画像の比較(ダル1)

### 3.3 反射光特性の実験解析

反射光特性を表面凹凸形状のデータのみから推定する解析フローを図5.9に示す。ダル面のように、微視的表面凹凸形状が高さによって異なる場合はその判定と処理が必要となる。表面の画像測定実験は図5.10の装置構成で行った。レンズは像倍率3倍の焦点距離が比較的長いLMCレンズを用いた。図5.11と図5.12に表面画像の実画像とシミュレーション画像の比較を示す。両者が比較的良く対応していることが分かる。さらに、表面輝度についても検討を行った。図5.13に示す装置構成で輝度を $5^\circ$ 刻みで測定した。一方、解析は輝度計の反射光を対象表面全域で重ね合わせるにより求めた。ただし、輝度の絶対値は実験と解析では対応しないため、両者の比較は比例関係のみを保

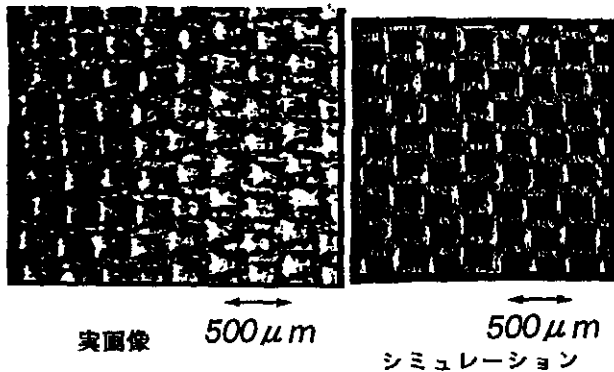


図5.12 実測画像とシミュレーション画像の比較(ダル2)

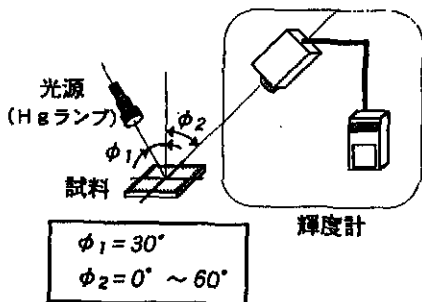


図5.13 輝度分布の測定システム

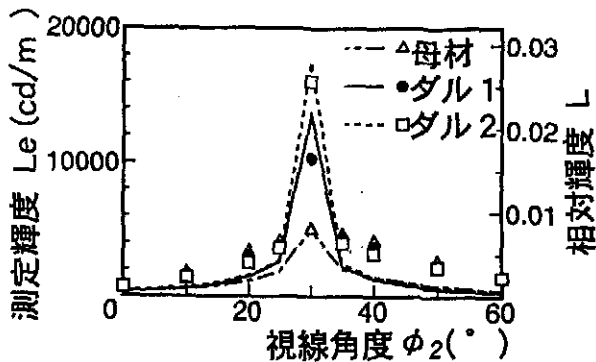


図5.14 輝度データの角度依存性と解析予測結果との比較

って図5.14のように表示することにした。実線と破線が実験データであり、各種のマークが解析結果を示す。両者の傾向はほぼ一致している。図5.11、12と図5.14より、本研究で提案した反射光分布の解析モデルは妥当なものであることが分かる。

### 4. 表面波形データおよび反射光強度分布からの形状異質部の抽出法

与えられた格子点状データにおいて巨視的な異質部を識別する方法を検討した。対象は規則的なパターン情報のない表面凹凸波形や反射光分布を想定した。図6.1に示すような方形格子点状の表面凹凸形状データを疑似的な母集団と見なし、その中にパッチという評価領域を設けて標本化する。そのパッチ内の幾何情報あるいは光学情報をパラメータ化し、新たに三次元表示を行うものである。このパラメータは目的特性に直結する性質を有することが前提となる。パッチの大きさとそれが母集団内をシフトする間隔を最適化することが重要な課題であるが、評価パラメータの分布形(ヒストグラム)から逆にパッチサイズの適正値が推定できるものと考えられる。測定領域全体で求めたパラメータの値にしきいを設けることにより上記と同様の三次元表示グラフにマッピングを施すことができる。しきい値以下が均等に散在している場合は異質部とは言い難く、逆に局所的に固まって出現した場合には異質部と認識して差し支えないものと考えられる。

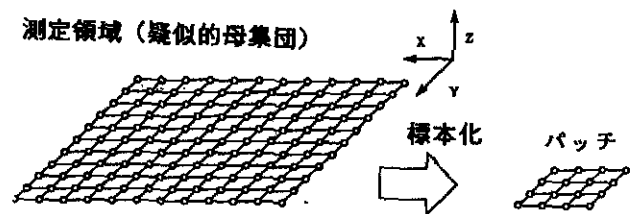


図6.1 評価領域を基準とした疑似的母集団の標本化

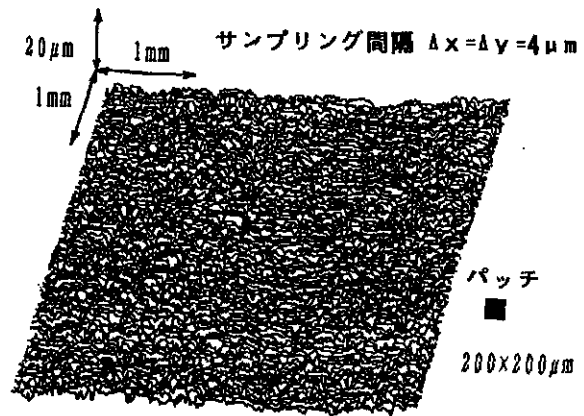


図6.2 鋼板の三次元表面凹凸波形(触針式粗さ測定器)

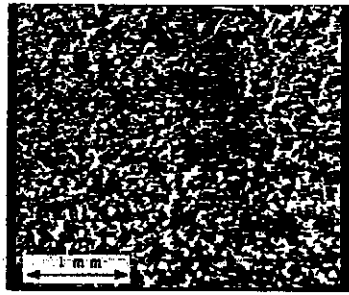


図6.3 鋼板表面の光学顕微鏡写真

一例として、図6.2に示した鋼板の三次元表面凹凸波形から形状異質部分の抽出を試みた。斜め入射光による図6.3の表面画像から形状異質部分が浮き彫りされているが、振幅情報のみからの認識は困難であった。そこで、表面画像の特徴が幾何光学により生じたものと考え、傾斜をパッチ内の評価パラメータとした。ただし、傾斜は正負の符号が含まれるため偶数次のモーメントを取ることにした。傾斜はサンプリング点の4点からなる方形から直接計算し、パッチ内で統計処理を行った。傾斜はxとy方向の2成分から成るので成分ごとの評価とした。パッチの大きさを変えた場合のx方向傾斜二次モーメントの三次元表示を図6.4に示す。シフト量はパッチ幅に比べて極端に大きくしない限りは問題が生じなかった。ここでは $40\mu\text{m}$ とした。パッチの大きさは形状異質部の大きさと連動するものであり、求めたい異質部によって設定されるべきである。測定領域(疑似的母集団)全域にわたる傾斜二次モーメントの度数分布を図6.5に示す。パッチの大きさによって分布の形態は著しく異なる。ここでは視覚的な品位を特性としているので、傾斜二次モーメント値の小さい部分を重視する。 $200 \times 200 (\mu\text{m})^2$ のパッチについてモーメントの平均値を求め、それに対するしきい値以下の部分をドットで示したものが図6.6である。平均値の10%をしきい値とした場合に、図6.3で得られた画像のパターンと対応する結果が得られた。

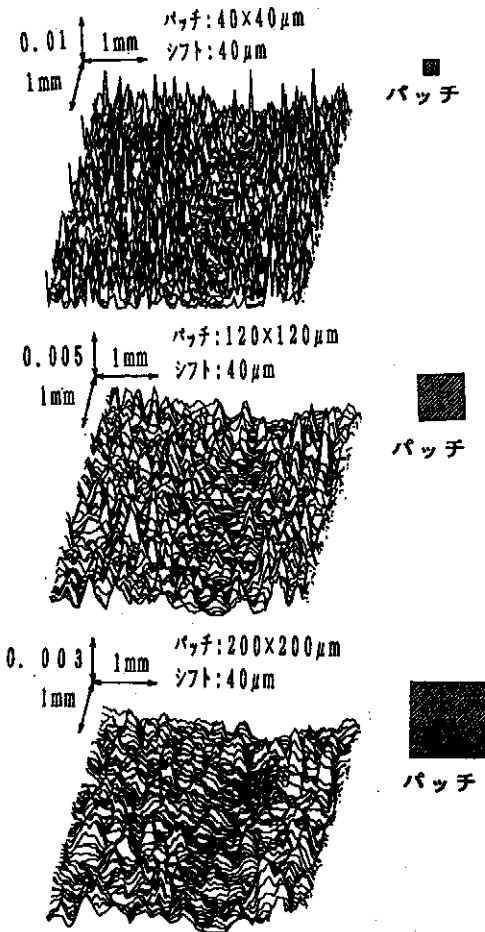


図6.4 傾斜(X方向)二次モーメントの三次元表示

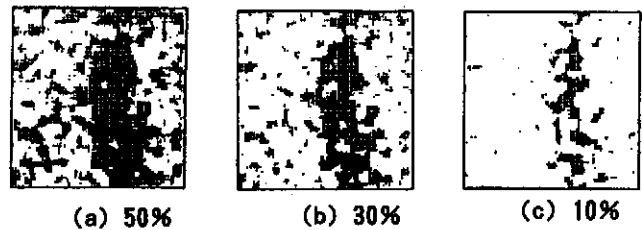


図6.6 しきい値以下を与えるパッチの位置

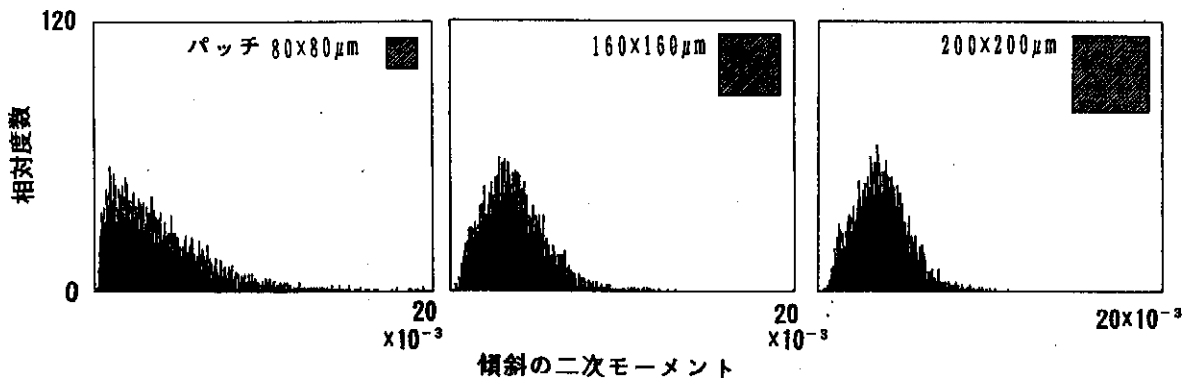


図6.5 傾斜二次モーメントのヒストグラム(測定領域全域)

なお、ここで示した例はパッチ内の評価パラメータとして微視的傾斜の偶数次モーメントを用いたが、巨視的な振幅が強調的に変化した部分を異質部として抽出する場合は単に平均振幅をパラメータとすべきである。また、設定したパッチの大きさが妥当であるか否かは、最初に述べたようにパラメータのヒストグラムより検討することができる。

## 5. おわりに

圧延ロール挙動の測定を高確度に行うための機構および制御法の開発研究を実施した。開発した機構要素は当該分野以外にも応用が可能である。また、表面形状の非接触測定法は周辺電子機器の進歩により容易に実践的な装置を構築することができるようになった。本研究ではその測定技法の実用性を再度確認したものである。用途と測定範囲を限定し、外乱を除去する周辺技術を付与することで実用化は可能である。

本研究では、反射光の特性と三次元表面凹凸形状との関係を解析的かつ実験的に定量化することを主たる課題とした。波動光学と幾何光学を機能的に組み合わせることに成功した。それを実現させるために、表面凹凸形状測定の方法論と形状情報の多次元的評価法を確立した。圧延加工の制御と製品の品質管理の両面に有益な情報を提供するものと考えらる。

## 6. 結び

圧延ロールの挙動と圧延板表面評価に関する結論は(2)に個別に述べた。

## 参考文献

- 4-1) (株) ミットヨ 製 サーフトテスト101S
- 4-2) 柳 和久ほか2名：反射レーザ光強度分布測定による精密加工面粗さの非接触評価技法、精密工学会誌、52.4、(1986) 723 - 726.
- 5.1) P.Beckmann and A.Spizzichno：The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface,N.Y., Pergamonn Press,(1963)
- 5-2) R.L. Cook and K. E. Torrance：A Reflectance Model for Computer Graphics,ACM Trans.on Graphics,1,1,(1982) 7 - 24